

En este número de la revista, la sección DE ANIVERSARIO presenta ocho artículos relacionados con el tema de las concepciones alternativas estudiantiles y el cambio conceptual.

Enseñando a comprender la naturaleza de la materia: el diálogo entre la química y nuestros sentidos

Miguel Ángel Gómez Crespo,¹ Juan Ignacio Pozo,² María Sagrario Gutiérrez Julián³

La química es una materia tradicionalmente considerada difícil por muchos alumnos, que se acercan a esta disciplina como quien se aproxima a una caverna misteriosa llena de secretos sólo aptos para iniciados (vestidos con bata blanca y trabajando con extraños aparatos) a los que sólo se puede acceder tras grandes esfuerzos y, muchas veces, con la incertidumbre de si formarán parte de los elegidos capaces de “superar” el reto. Sin embargo, la química es algo presente en nuestra vida diaria y más familiar de lo que parece. Pero, efectivamente, como muestra la experiencia de los profesores, aprender química no resulta sencillo. ¿Por qué es difícil aprender química? Lógicamente, la respuesta va a tener que ver con las características de los contenidos propios de esta materia. Pero, también va a tener que ver con aspectos más amplios del aprendizaje relacionados con cómo se aprende la ciencia. En este artículo vamos a intentar analizar algunos de los procesos que tienen lugar cuando el alumno intenta aprender algunos de los contenidos de la química y las dificultades que encuentra. Pero, también, presentaremos algunas propuestas de estrategias de enseñanza orientadas a facilitar el cambio conceptual.

El aprendizaje de la ciencia

Son muchas las investigaciones que se han hecho en los últimos años en relación con la comprensión de los procesos de aprendizaje de la Ciencia. Muchos de estos trabajos se han centrado en estudiar las ideas intuitivas fuertemente arraigadas con las que los alumnos llegan a la escuela y las dificultades que esas ideas supuestamente provocan en la adquisición del conocimiento científico, de modo que muchas de esas ideas persisten incluso después de varios años

de instrucción específica. A partir de estos estudios se ha asumido que aprender ciencia requiere un profundo cambio conceptual que ayude a reorganizar las representaciones intuitivas o cotidianas de los alumnos y que, por tanto, para lograr un verdadero aprendizaje de la ciencia es preciso diseñar estrategias de enseñanza orientadas al logro de ese cambio conceptual.

Aunque existen muy diversas interpretaciones de la naturaleza de esas ideas y los procesos mediante los que pueden cambiarse (véase por ejemplo, Glynn y Duit, 1995; Limón y Mason, 2002; Pozo y Gómez Crespo, 1998; Rodríguez Moneo, 1999; Schnotz, Vosniadou y Carretero, 1999), desde todas ellas se asume que esas dificultades en la comprensión y aprendizaje de la ciencia se deben en buena medida a que el conocimiento científico que se pretende enseñar resulta contrario a muchas de las suposiciones y creencias que los seres humanos tenemos sobre el mundo. Desde nuestro punto de vista, ese aprendizaje requerirá no sólo acercar los saberes científicos a la gente sino hacerlo de tal manera que facilite, más allá del cambio conceptual, un cambio representacional (Pozo, 2002; Pozo y Rodrigo, 2001), un cambio en la forma de representarse el mundo que permita la comprensión y asimilación de las teorías y los modos de hacer ciencia. Según esta idea, las capacidades necesarias para hacer ciencia no formarían parte del equipamiento cognitivo de serie de los seres humanos, sino que son un costoso extra cultural y educativo (Pozo y Gómez Crespo, 2002 a y b). Por tanto, aprender ciencia requiere dotar al alumno de capacidades y formas de pensar, que son difíciles de incorporar a un sistema cognitivo que resulta muy eficaz en el mundo cotidiano, aunque restrinja seriamente su capacidad de representar el mundo mediante los modelos y teorías de la ciencia. Modelos que se enseñan en la escuela, muchas veces sin fijar sus limitaciones, y con los que, para disminuir su complejidad, se trabaja en condiciones idealizadas. Frente a ellos, los alumnos manejan sus modelos cotidianos que les permiten, en muchos casos, describir la realidad de una forma aproximada, pero

¹ I.E.S. Victoria Kent. Torrejón de Ardoz, Madrid.

² Facultad de Psicología. Universidad Autónoma de Madrid.

³ I.E.S. Tirso de Molina. Madrid.

* Este trabajo se ha realizado dentro del Proyecto de investigación BSO2002-01557, financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España, bajo la dirección del segundo autor.

más sencilla, y, sobre todo, hacer predicciones correctas sobre el mundo que les rodea, aunque las explicaciones que proporcionan puedan resultar erróneas.

Numerosas investigaciones muestran que el conocimiento cotidiano con el que los alumnos llegan a la escuela compite, la mayoría de las veces con ventaja, con el conocimiento científico que se intenta transmitir a través de ella. No encuentran la necesidad de recurrir a modelos más complejos cuando manejan otro más simple. Cambiar ese conocimiento cotidiano y las “concepciones alternativas” a las que da lugar requiere algo más que sustituir las ideas de los alumnos por otras científicamente más aceptables, como tradicionalmente se ha intentado. Se hace necesario modificar los principios, implícitos, a partir de los que los alumnos han elaborado su conocimiento, que en la mayoría de los casos son diferentes a los que estructuran las teorías científicas (Pozo y Gómez Crespo, 1998).

Centrándonos en la química, son muchas las dificultades de aprendizaje que se han investigado, por lo que no es posible abordarlas de modo exhaustivo en este trabajo (véase, por ejemplo: Driver *et al.*, 1994; Garnett *et al.*, 1995; Gómez Crespo, 1996; Mortimer, 2001; Osborne y Freyberg, 1985; Pozo y Gómez Crespo, 1998; Pozo *et al.*, 1991). Por tanto, vamos a centrarnos en uno solo de estos aspectos: la comprensión de la naturaleza corpuscular de la materia, sobre cuyas dificultades de aprendizaje se han acumulado numerosos estudios que muestran la existencia de fuertes concepciones intuitivas, que parecen oponerse a esa comprensión, y que persisten incluso después de largos periodos de instrucción (por ejemplo: Benlloch, 1997; Gabel y Bunce, 1994; Gómez Crespo, Pozo y Sanz, 1995; Huann, 2000; Llorens, 1991; Niaz, 2000; Pozo, Gómez Crespo y Sanz, 1999; Stavy, 1995). Al igual que ocurre en otros dominios de la ciencia, las concepciones intuitivas, o “teorías implícitas” (Pozo y Gómez Crespo, 1998), sobre la naturaleza de la materia y sus cambios son producto de lo que podríamos considerar el “sentido común” —o el funcionamiento cognitivo intuitivo— aplicado a la predicción y control de los fenómenos cotidianos, lo que da lugar a concepciones y representaciones que están mediadas por nuestros sentidos, por la forma en que percibimos el mundo en que vivimos, y que están estructuradas, como se ha dicho, en torno a unos principios muy diferentes de los que estructuran las teorías científicas.

La comprensión de la estructura de la materia

La comprensión de la estructura de la materia es un núcleo importante de contenidos, dentro de la química que se estudia en la educación secundaria, que hace referencia a la interpretación de las propiedades y los cambios de la materia; cambios y propiedades que pertenecen al mundo de lo que podemos observar con nuestros sentidos, el mundo macroscópico. Uno de los objetivos de la educación secundaria es que los alumnos aprendan a interpretar esos fenómenos macroscópicos en términos microscópicos (submicroscópicos, en sentido estricto); es decir, que aprendan a utilizar el modelo corpuscular de la materia como instrumento interpretativo de los distintos fenómenos que tienen lugar en la naturaleza. Este modelo resulta fundamental para poder explicar, por ejemplo, las diferencias entre los diferentes estados de la materia, sus propiedades y los cambios, físicos o químicos, que experimentan. Sin embargo, descender al terreno microscópico implica asumir que, para explicar la realidad macroscópica de la materia —que en muchos casos se nos presenta, como continua y estática—, la ciencia nos propone un modelo interpretativo (la teoría cinético corpuscular) basado en tres ideas: la materia está formada por pequeñas partículas que no podemos ver; las partículas se encuentran en continuo movimiento, frente a la apariencia estática con la que se nos presenta; entre esas partículas no hay absolutamente nada, lo que conlleva algo tan contraintuitivo como la idea de vacío y una naturaleza discontinua, frente a la apariencia continua con que la percibimos.

Estas tres ideas resultan fundamentales para explicar las diferencias entre los diferentes estados de la materia (sólido, líquido y gas) y todos los cambios que experimenta. Así, por ejemplo, si ponemos un globo al sol, al cabo de un rato vemos que se ha hinchado un poco. Desde un punto de vista macroscópico la explicación sería que, con el calor, el aire que hay en su interior se ha dilatado o bien que el aumento de temperatura hace aumentar la presión del aire en el interior. Sin embargo, el modelo microscópico nos permite ir más allá y explicar por qué se ha producido ese cambio. El calor provoca un aumento de la energía cinética media de las partículas o, lo que es lo mismo, un aumento en la agitación de las partículas que componen el aire del interior. El aumento de agitación de las partículas se traduce en una mayor violencia en las colisiones contra las paredes del globo, lo que provoca, al ser elásticas, que aumente la distancia entre las partículas que

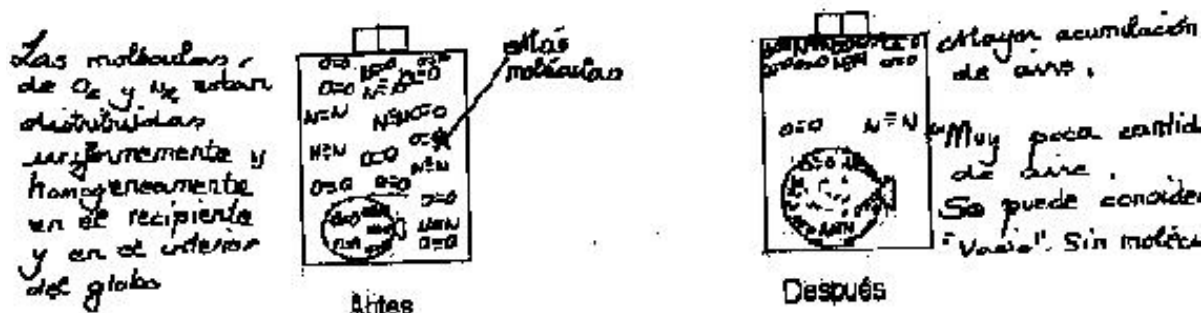


Figura 1. Ejemplo de respuesta en la que se emplea una terminología química, pero el sujeto considera que las partículas que constituyen el aire se distribuyen en las paredes del globo y en la parte alta del recipiente.

componen el aire. En definitiva, la teoría cinético corpuscular permite establecer mecanismos causales para explicar los cambios de la materia.

Las investigaciones realizadas muestran que los estudiantes aceptan fácilmente el modelo corpuscular que se enseña en la escuela, pero no lo utilizan de forma espontánea y recurren, para sus explicaciones, a sus teorías cotidianas, basadas en las propiedades macroscópicas de la materia, más cercanas a las dimensiones “físicas” del mundo real (Pozo, Gómez Crespo y Sanz, 1999). Tan sólo, cuando la situación lo induce de alguna manera (la pregunta del profesor, el contexto de la tarea, etcétera) recurren a este modelo; pero, cuando lo hacen, en muchas ocasiones asignan a las partículas todas aquellas propiedades que atribuyen al mundo que les rodea. Para ellos, la teoría corpuscular no es realmente un modelo explicativo de las propiedades de la materia, tal como nos plantea la ciencia, sino que más bien necesitan recurrir a su conocimiento cotidiano para poder explicar y comprender esas teorías “extrañas” que se explican en la escuela y que es necesario aprender. Es decir, trastocando los papeles, se acaba por explicar el funcionamiento de las partículas a partir de las propiedades del mundo macroscópico, en lugar de hacerlo a la inversa (Pozo y Gómez Crespo, 2002a). El resultado es que tras un decorado aparentemente químico, al que se han ido incorporando términos más o menos “técnicos” (molécula, iones, enlaces, cargas, etcétera), permanece un entramado conceptual que corresponde al conocimiento cotidiano del que se partía.

Podríamos recurrir a numerosos estudios para avalar estas afirmaciones, pero no pretendemos hacer aquí un repaso minucioso de las investigaciones

en esta área, sino más bien ilustrar el problema con algunos ejemplos de esta resistencia al cambio conceptual, que hemos encontrado incluso entre estudiantes universitarios de química. Así, en una de nuestras investigaciones más recientes (Gutiérrez Julián, Gómez Crespo y Pozo, 2002; Pozo, Gutiérrez Julián y Gómez Crespo, 2004) entrevistamos a alumnos que habían terminado en España su licenciatura en Ciencias Químicas o Físicas y que estaban completando un periodo de formación en didáctica de la Física y Química que les facultaría para ser profesores de secundaria al año siguiente. En una de las situaciones, a estos alumnos se les mostraba cómo aumentaba el tamaño de un globo lleno de aire en el interior de un recipiente en el que se hacía parcialmente el vacío y se pedía una explicación del fenómeno.

Entre las respuestas que hemos hallado, hay varias como la que se recoge en la figura 1, en la que el sujeto muestra sus conocimientos de química, conoce perfectamente la composición del aire y representa los enlaces entre átomos; sin embargo, a la hora de explicar lo que ocurre interpreta que las moléculas de oxígeno y nitrógeno se acumulan en las paredes del globo o en la parte superior del recipiente. Es un ejemplo claro en el que se redescrive el modelo científico en el modelo cotidiano y no al revés como deberíamos esperar. En otros casos hemos encontrado cómo son incapaces de interpretar el problema en términos de equilibrio y conciben que la presión del aire del recipiente disminuye al sacar parte del aire, pero la del interior del globo debe aumentar para que pueda hincharse. De forma semejante, aceptan que al hacer el vacío haya menos partículas de aire en el recipiente y estén más separadas entre sí; sin embargo, conciben que para que el globo

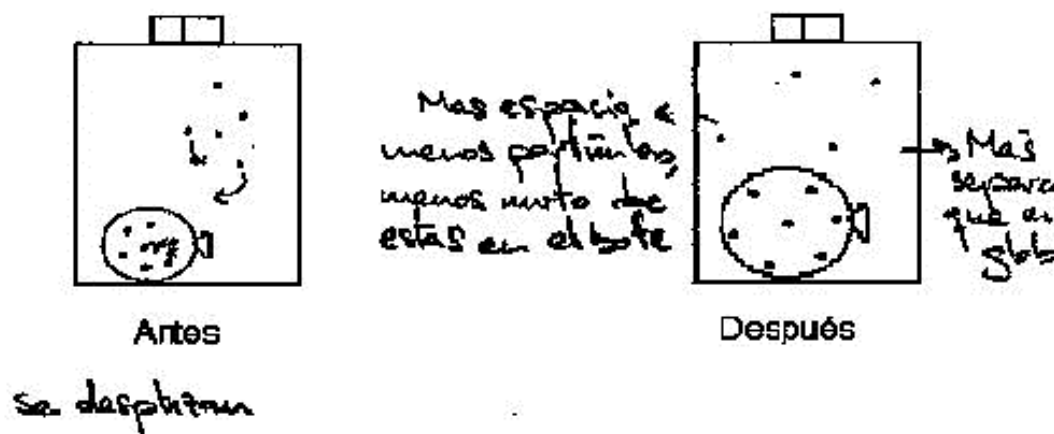


Figura 2. Ejemplo de respuesta en la que el sujeto encuentra dificultades para concebir el equilibrio de partículas entre el interior del globo y el exterior.

se pueda hinchar la separación media de las partículas en su interior debe ser mucho menor que la de las partículas en el recipiente (véase la figura 2).

Otro ejemplo es el de una persona, también licenciada en química, que aunque conoce los modelos que describen la materia y acepta su naturaleza discontinua, no es capaz de concebir el vacío entre las partículas que conforman una sustancia en estado sólido. Así, al discutir sobre la composición del hierro, diferencia entre los modelos teóricos de la química y lo que él “realmente” ve en un trozo de hierro “de verdad”: *Tú abstraes y haces modelos, pero entre los átomos de hierro, tiene que haber hierro $\frac{1}{4}$. Otra cosa es que tú hayas estudiado que están los cationes juntos y que todos los electrones de alguna manera se separan del núcleo y están formando una nube de electrones. Eso es cuando tú haces los cálculos $\frac{1}{4}$ ¡Pero es que es hierro de verdad! $\frac{1}{4}$*

Vemos pues que los estudiantes —no sólo los alumnos de secundaria sino incluso los que tienen ya estudios especializados en química y van a ser, posiblemente, en un futuro cercano profesores de química en secundaria— tienden a interpretar los distintos fenómenos, tanto físicos como químicos, desde una perspectiva realista en la que se buscan semejanzas entre los efectos o fenómenos que observan (de naturaleza macroscópica) y las causas o modelos (de naturaleza microscópica) desde los que supuestamente deberían explicarlos (véase Pozo y Gómez Crespo, 1998). Por tanto, nada más “razonable” (o intuitivo, de sentido común) que atribuir a las partículas (causas) las mismas características de los fenómenos del mundo que podemos observar (efectos). El resultado es que, aunque acepten la “existencia”

de partículas que no pueden verse, tienden a atribuirles las mismas propiedades que observan en el mundo macroscópico; por ejemplo, las propiedades del sistema del que forman parte, interpretando que son pequeños trozos de la misma materia, tal como la percibimos. De esta forma, los átomos de cobre deberían tener un aspecto rojizo, las moléculas del agua serían como pequeñas gotas de agua, etcétera. Además, para poder explicar los cambios macroscópicos que la materia experimenta (cambios en las propiedades del sistema), se interpreta que las partículas (los componentes del sistema) también experimentan los mismos cambios que se perciben a nivel macroscópico en la materia observable (por ejemplo, las moléculas de agua podrían evaporarse, las de alcohol arder, las partículas que componen el aire dilatarse, etcétera). Así, para la mayoría de los estudiantes, las partículas, al igual que la materia que perciben, tienen un estado natural que es el reposo, de forma que sólo se moverán si hay un agente o causa externa que provoque el movimiento (por ejemplo, movimiento del objeto en los sólidos, o del recipiente o al agitar en el caso de los líquidos, presencia de una corriente de aire para los gases, etcétera). De la misma manera, frente a la idea de discontinuidad con partículas separadas por un espacio vacío, los estudiantes tienden a representarse una materia continua en la que o bien no hay nada entre las partículas que la componen (están muy juntas, sin huecos) o bien hay otra sustancia que ocupa todos los rincones (por ejemplo, el aire).

Pero no todas las dificultades se presentan al mismo nivel. Así, hemos encontrado que el aspec-

to más difícil de aceptar en todas las edades, al igual que ocurrió históricamente, es la discontinuidad de la materia y la idea de vacío. Le sigue en dificultad la aceptación del movimiento intrínseco de las partículas que componen la materia. Y, por último, lo que menos dificultades plantea es la aceptación de los mecanismos implicados en los cambios de la materia (véase, por ejemplo: Gómez Crespo y Pozo, 2000 y en prensa; Pozo y Gómez Crespo, en prensa).

Como consecuencia de esta perspectiva realista y centrada en la forma en que el sujeto percibe la materia, el aspecto físico de esa materia, la forma en que se presenta es una variable muy relevante a la hora de analizar y dar sentido a las interpretaciones que los estudiantes hacen sobre las propiedades y cambios de la materia. En contra de lo que nos propone la ciencia, nuestro sentido común nos informa de diferente manera de las características de la materia en sus tres estados: sólido, líquido y gas (Pozo y Gómez Crespo, 1998). Tenemos datos que muestran cómo los alumnos, a pesar de haber recibido una instrucción específica en química, aplican de forma diferente la teoría corpuscular a cada estado de la materia (Gutiérrez Julián, Gómez Crespo y Pozo, 2002). Los resultados parecen indicar que las teorías alternativas, de carácter macroscópico, restringidas por la información que nos proporcionan nuestros sentidos, son muy consistentes. Sin embargo, no hay una representación global consistente, independiente de la apariencia perceptiva. Por tanto, podríamos decir que aunque los sujetos carecen de una teoría global sobre la naturaleza de la materia, disponen de teorías específicas para cada uno de sus estados de agregación. Cuando las formas de organización de la materia cambian, y con ellas la apariencia física del mundo, adoptando el aspecto de un gas, un líquido o un sólido, las representaciones también cambian. Aprender química, desde este punto de vista, implicaría superar las restricciones que impone la apariencia de la materia hasta llegar a utilizar una única representación (la teoría científica) para los tres estados de la materia (Gómez Crespo y Pozo, 2001; Pozo y Gómez Crespo, en prensa).

Pero el dato que resulta más llamativo es que el patrón de representaciones sobre la naturaleza de la materia obtenido para estudiantes de secundaria también se repite, en proporciones muy elevadas, entre sujetos que pueden considerarse, a todos los efectos, como “expertos” en química: los recién licenciados y potenciales profesores de física y química (más arriba hemos puesto algunos ejemplos).

En esta línea, los datos obtenidos en nuestras investigaciones (Pozo, Gómez Crespo y Sanz, 1999; Gómez Crespo y Pozo, 2001; Pozo y Gómez Crespo, en prensa) ya mostraban que los estudiantes universitarios disponían de múltiples representaciones sobre la naturaleza de la materia, que activaban diferencialmente en función del contexto.

El cambio conceptual como redescrición representacional: hacia un modelo de enseñanza

Como hemos señalado, las investigaciones realizadas muestran que los sistemas de representación que se utilizan en la enseñanza de la química, fundamentalmente simbólicos, no facilitan, en muchos casos, la integración y diferenciación de las teorías macroscópicas con que interpretamos el mundo y las teorías microscópicas que nos proporciona la ciencia. Tanto las investigaciones realizadas por nosotros, a las que nos hemos venido refiriendo, como las de otros muchos autores muestran que las teorías implícitas o cotidianas de los alumnos sobre la naturaleza de la materia y sus cambios persisten, en muchos casos, a pesar de la instrucción y no son sustituidas por las teorías científicas. Incluso los intentos de producir, mediante procedimientos instruccionales específicos, un cambio conceptual en este dominio, al igual que en otros muchos, han tenido resultados peores de lo esperado. La mayor parte de los intentos por lograr un cambio conceptual mediante estrategias de instrucción científica han estado esencialmente dirigidos a reemplazar formas simples de conocimiento —las llamadas *misconceptions* o ideas erróneas de los alumnos, por ejemplo, en nuestro caso la creencia de que la materia es estática y continua, tal como aparenta— por conocimientos científicos complejos. Los resultados de esos intentos han sido, como decimos, más bien frustrantes, hasta el punto de que Duit, uno de los máximos estudiosos del cambio conceptual, haya llegado a afirmar que “no hay ni un solo estudio en la literatura de investigación sobre las concepciones de los estudiantes en la que una concepción concreta de las profundamente arraigadas en los alumnos haya sido totalmente extinguida y sustituida por una nueva idea. La mayoría de las investigaciones muestran que hay sólo un éxito limitado en relación con la aceptación de las ideas nuevas y que las viejas ideas siguen básicamente “vivas” en contextos particulares” (Duit, 1999, p. 270).

Hay diversas explicaciones de esas dificultades para lograr un verdadero cambio conceptual, en

cuyo detalle no podemos entrar aquí (véase Pozo, 2002, 2003; Pozo y Gómez Crespo, 1998). Pero, en nuestra opinión, la razón principal por la que no se ha logrado el abandono de esas teorías implícitas es que el aprendizaje de la ciencia, en forma de cambio conceptual, no requiere en realidad el abandono de las teorías implícitas o cotidianas en favor de un conocimiento más elaborado, sino, de acuerdo con un modelo de adquisición de conocimiento como un proceso de redesccripción representacional, la interacción jerárquica de unos sistemas de representación en otros (Pozo, 2003; Pozo y Gómez Crespo, 2002a). Según esta idea, adquirir conocimiento no implica sustituir unas ideas por otras, sino multiplicar las perspectivas o formas de ver el mundo, y finalmente integrar esas diversas perspectivas o niveles de análisis de la realidad en una única teoría que redescriba las relaciones entre esos componentes en un nuevo nivel. No basta ya por tanto con representar el mundo a través de las teorías, sino que hay que representar las propias teorías.

Por tanto, aprender ciencia requiere no sólo ir más allá de las representaciones encarnadas e implícitas que nos proporciona el equipamiento cognitivo de serie, sino redesccribir esa experiencia del mundo físico en nuevos niveles representacionales que sólo serán posibles mediante la instrucción. El conocimiento científico no puede sustituir a otras formas de saber, pero sí puede integrar jerárquicamente a algunas de ellas, redescribiendo (es decir, explicando) sus predicciones, su visión del mundo. Para ello hay que superar la idea de que esos conocimientos previos son concepciones erróneas —o *misconceptions*—, el término más utilizado durante muchos años, y en su lugar intentar que ese conocimiento científico sirva para dar sentido a las representaciones encarnadas que todos tenemos. La química puede redesccribir ciertos fenómenos de cocina —véase por ejemplo, Córdova (1990)— pero sería empobrecedor reducir la cocina a una actividad química.

Sin embargo, como hemos visto, nuestras investigaciones han mostrado no sólo que los alumnos no abandonan sus representaciones implícitas o encarnadas, sus concepciones macroscópicas de la materia (como algo continuo y estático a no ser que un agente externo actúe sobre ella) sino incluso que cuando los alumnos intentan relacionar ambas formas de ver la materia (macroscópica y microscópica) tienden a explicar los fenómenos moleculares a partir de su experiencia macroscópica y no a la inversa, como sería deseable (por ejemplo, Pozo, Gómez

Crespo y Sanz, 1999). Por ello, nuestra meta debería ser que los alumnos comprendieran que existen distintas formas de aproximarse a un fenómeno, que se pueden utilizar diferentes modelos alternativos en la interpretación y comprensión de los fenómenos de la naturaleza (pluralidad representacional), pero también unos son capaces de explicar más cosas que otros (integración jerárquica). De esta manera, el modelo corpuscular de la materia sería capaz de ir más allá de las explicaciones macroscópicas. Así, si macroscópicamente somos capaces de explicar la difusión de un perfume en una habitación cerrada diciendo que los gases se mezclan y tienden a ocupar todo el volumen del recipiente, el modelo corpuscular nos permite profundizar en el mecanismo de cómo se produce esa mezcla. Por tanto, el objetivo que debemos perseguir es que los alumnos redescriban sus representaciones implícitas a partir de los modelos microscópicos presentados durante la instrucción formal, y no al revés, distinguiendo lo que es capaz de explicar cada modelo y hasta qué punto es útil y sin que ello en ningún caso suponga hacerles renunciar o abandonar su “sentido común”.

¿Cómo podemos conseguir esto? No se trata sólo de que el profesor le diga al alumno lo que explica una teoría y lo que explica otra. Si de verdad queremos que haya una redesccripción representacional, que el alumno comprenda la diferencia entre las teorías o modelos que puede utilizar para interpretar la estructura de la materia, es necesario proporcionarle ocasiones para que maneje esas teorías y esos modelos, que tenga oportunidades de utilizarlos y compararlos para predecir y explicar fenómenos, para resolver problemas, etcétera. Por todo ello, creemos que el objetivo sería más fácil de alcanzar a partir de estrategias de enseñanza basadas en la utilización, por parte del alumno, de modelos alternativos que pueda manipular y contrastar, haciendo explícita la diferencia entre ellos y fomentando la distinción entre los diferentes niveles de explicación.

¿Cómo enseñar la teoría corpuscular de la materia?

Dentro de esta estrategia de enseñanza basada en la explicación y contrastación de modelos (Pozo y Gómez Crespo, 1998) estamos iniciando una investigación sobre el aprendizaje de la teoría corpuscular de la materia mediante estrategias de instrucción basadas en la comparación de modelos frente a las estrategias expositivas que se limitan a la descripción de las teorías científicas y a la realización de tareas

de aplicación de esas teorías. Nuestra hipótesis es que los estudiantes que reciban una instrucción basada no sólo en la diferenciación entre modelos macroscópicos y modelos microscópicos, sino también en su integración jerárquica de ambos niveles representacionales, obtendrán mejores resultados en la comprensión de la teoría cinética de la materia, y estamos aplicando esa estrategia al aprendizaje de la teoría corpuscular de la materia. En esta línea hemos comparado las diferencias de aprendizaje entre dos grupos de estudiantes de 3º de Educación Secundaria Obligatoria (14-15 años), el curso en el que se desarrollan en España estos contenidos.

El método de instrucción que vamos a describir a continuación se ha puesto en práctica en el marco de una Unidad Didáctica, más amplia, dedicada en su conjunto a la estructura de la materia, que se ha desarrollado en un periodo de entre cuatro y cinco semanas, de las que entre dos y tres (aproximadamente 10 clases) se dedican al estudio de la teoría cinética corpuscular y su utilidad para interpretar la estructura de la materia y sus cambios. La instrucción se ha realizado, por tanto, en grupos reales de aula, sin alterar la marcha del curso ni las condiciones materiales de trabajo con esos grupos, introduciendo los distintos contenidos en el momento fijado por la programación del curso.

En una primera fase de la unidad didáctica se han introducido las características de la materia, su diversidad y algunas de sus propiedades. Los alumnos han trabajado las diferencias entre los tres estados de la materia y realizado actividades encaminadas a reconocerlas, así como reconocer y diferenciar propiedades como masa, volumen y densidad. En una segunda fase, la que es objeto de nuestra investigación, se presenta la teoría corpuscular como un modelo interpretativo de la materia que nos ayuda a explicar las propiedades y los cambios que experimenta la materia. Fundamentalmente se basa en la realización de actividades encaminadas a que los alumnos la apliquen a la resolución de tareas en las que deben explicar el comportamiento de la materia, tanto en lo que se refiere a sus propiedades observables (o macroscópicas) como a las no observables (o microscópicas). Al exponer la teoría corpuscular de la materia (microscópica) se señalan claramente las diferencias con las explicaciones macroscópicas, las diferencias entre la realidad que nos presenta nuestra percepción (macroscópica) y las explicaciones basadas en la teoría corpuscular (microscópica). Así, en todas las actividades realizadas se analizan

las diferencias entre la descripción macroscópica y la explicación microscópica del problema, de forma que los alumnos utilicen las dos aproximaciones, las contrasten y sean capaces de diferenciar los dos niveles de análisis, pero también, de acuerdo con la hipótesis de la integración jerárquica (Pozo, 2003; Pozo y Gómez Crespo, 1998, 2002b), de relacionarlos jerárquicamente o, si se prefiere, de redescubrir representacionalmente, en términos de Karmiloff-Smith (1992), el nivel macroscópico (nuestra percepción del mundo) en términos de los modelos microscópicos (teoría corpuscular). Para ello se hace mucho hincapié en que todos los alumnos participen activamente en la resolución de la tarea y en los debates en los que se discuten y analizan sus propuestas. La idea fundamental es que el alumno tenga suficientes oportunidades de utilizar ambos niveles de explicación, hacer predicciones y buscar explicaciones a distintos fenómenos mediante un conjunto de actividades graduadas y secuenciadas (muchas de las cuales han sido adaptadas de propuestas recogidas en la bibliografía, por ejemplo, Osborne y Freyberg, 1985 o Driver, Guesne y Tiberghien, 1984), que permiten trabajar en primer lugar las ideas de movimiento y vacío, para posteriormente introducir el efecto de la temperatura en los mecanismos implicados en los cambios de la materia en los que se conserva el estado inicial y ampliarlos posteriormente a fenómenos en los que hay un cambio de estado.

La secuencia de instrucción seguida en el bloque de actividades dedicadas a estos contenidos se resume en los siguientes pasos:

1. Introducción del modelo

Los alumnos previamente han realizado, como ya se ha dicho, actividades dirigidas a describir e interpretar las propiedades observables, de modo que ya han explicitado algunas de sus creencias intuitivas y hayan visto algunas de sus limitaciones explicativas.

Presentación por parte del profesor de la teoría cinética, centrada en tres ideas fundamentales:

- Partículas que no se pueden ver.
- Movimiento continuo de esas partículas.
- Entre las partículas no hay nada (vacío).

2. Primeras aplicaciones del modelo

Actividad 1. ¿Qué diferencias existen entre los tres estados de la materia?

Aplicación teórica del modelo a la explicación de las características de los tres estados de la materia. Se

busca la relación entre el aspecto macroscópico y la interpretación microscópica.

- El profesor retoma las diferencias entre las propiedades de sólidos, líquidos y gases y la necesidad de buscar una explicación a sus diferentes comportamientos. Los alumnos proponen explicaciones (generalmente macroscópicas).
- El profesor conduce el debate hacia la utilización de las partículas en la interpretación de la apariencia macroscópica de la materia en sus tres estados, es decir, de la forma propia de los sólidos, la fluidez de los líquidos y el hecho de que los gases tiendan a ocupar todo el volumen del recipiente. El profesor concluye mostrando la aplicación del modelo microscópico a los tres estados de la materia y resaltando aquellos aspectos que sólo se pueden explicar mediante este modelo.

Actividad 2. Interpretación de la difusión de un gas (Experiencia en el aula)

Utilización de la teoría cinética en la interpretación de la difusión de los gases. El objetivo principal es introducir un ejemplo relativamente sencillo para los alumnos al que puedan aplicar las ideas básicas del modelo microscópico. Se elige un gas porque, según las investigaciones realizadas, es el estado de la materia en el que, por sus propiedades macroscópicas, anteriormente estudiadas, resulta más fácil de aceptar las ideas de movimiento y vacío.

El profesor plantea qué ocurrirá si deposita una sustancia con olor penetrante en una esquina del aula (por ejemplo, un perfume). Se pide una predicción a los alumnos y se realiza la experiencia. Se pide a los alumnos, en sus pupitres, que avisen cuando les empiece a llegar el olor, para después pasar a analizar el problema. Previamente se cierran bien todas las puertas y ventanas y se pide a los alumnos que estén quietos, para que el aire de la habitación pueda considerarse en reposo.

En la pizarra se hace (el profesor o un alumno) un esquema del aula que represente cómo se va difundiendo el olor y a dónde llega antes. Se pide a los alumnos que traten de encontrar una explicación a por qué se ha difundido el perfume por el aula. Sigue un debate con todo el grupo.

Generalmente, en esta primera experiencia casi todas las explicaciones obtenidas son de tipo macroscópico y recurren a un agente externo (generalmente, el aire) como vehículo de transporte o causa del movimiento. Por ello, el profesor debe resaltar la

idea de que el aire estaba en reposo para reconducir el debate.

Si no surge espontáneamente, el profesor debe pedir que se trate de explicar qué relación tendría la teoría cinética con el fenómeno observado. Para tratar de centrar el problema se puede pedir que intenten ver la influencia de cada una de las tres ideas principales en el problema.

Tras la exposición de resultados el profesor plantea cómo han ido surgiendo los dos niveles de explicación macroscópico y microscópico y ayuda a establecer las diferencias entre ellos, insistiendo especialmente en la diferencia entre el movimiento intrínseco de las partículas (nivel microscópico) y el movimiento causado por un agente externo (nivel macroscópico).

A partir de este punto, el profesor plantea cómo pueden darse siempre los dos niveles de análisis y cómo en las experiencias que se van a seguir realizando se va a intentar buscar siempre esos dos niveles.

3. Generalización del contraste de modelos a otros fenómenos

En esta fase se plantean una serie de experiencias, tanto prácticas como teóricas, que los alumnos deben intentar interpretar. El profesor plantea las tareas y pide a los alumnos que elaboren por escrito los dos tipos de explicación (macroscópica y microscópica), marcando sus diferencias y qué pueden explicar en cada caso. Posteriormente se debaten en el aula las distintas interpretaciones, de forma que los alumnos traten de encontrar los fallos y contradicciones y llegar a una explicación más completa e integradora. Al final, el profesor recapitula y destaca las diferencias entre las explicaciones obtenidas.

Actividad 3. Compresión y expansión del aire en una jeringuilla (experiencia de aula).

El profesor reparte jeringas a los alumnos y pide que, tapando el orificio de salida, traten de bajar o subir el émbolo. Da un tiempo para que jueguen y experimenten con ellas.

Tras ello, plantea una serie de preguntas: ¿por qué se comprime el aire?, ¿por qué cuesta más bajar el émbolo cuanto más comprimido está?, ¿por qué vuelve siempre a su posición inicial?, ¿qué diferencias hay con la expansión, cuando se tira del émbolo hacia arriba?, ¿por qué encuentra dificultades para la expansión?, etcétera.

Los alumnos buscan explicaciones y debaten sobre ellas. Normalmente, en el debate, ellos mismos son

capaces de corregirse unos a otros y llegar a una explicación bastante correcta. En cualquier caso, el profesor debe reconducir el debate hacia el objetivo marcado.

De la misma forma, una vez analizado el problema se pide que traten de predecir qué ocurriría si la jeringa estuviera llena de agua o de arena y que expliquen el por qué de su predicción.

Éste es el momento idóneo para introducir las primeras nociones de equilibrio en el sistema, tanto macroscópico como microscópico.

Las ideas principales que se trabajan con esta tarea son: espacio vacío entre las partículas que componen el aire, imposibilidad de que haya más aire, movimiento de las partículas y distinta separación entre partículas en sólidos, líquidos y gases y, en consecuencia, distintas fuerzas de cohesión dependiendo del estado de agregación.

Actividad 4. Disolución de una gota de tinta (experiencia en casa)

Se pide que los alumnos, en sus casas, experimenten y observen durante un cierto tiempo lo que ocurre en un vaso de agua en el que se ha depositado una gota de tinta (u otra sustancia coloreada) y se ha dejado totalmente en reposo durante un tiempo largo. Se pide también que traten de explicar por qué tiene lugar el fenómeno observado.

Deben llevar a clase un informe de sus resultados en el que aparezca la explicación de lo ocurrido.

El profesor organiza el debate, en primer lugar, en torno a los resultados obtenidos en el experimento. Estos resultados pueden ser aparentemente dispares en función de las condiciones en que se ha realizado. Debe orientarse el debate hacia la búsqueda de los elementos comunes, la disolución y dispersión de la sustancia coloreada en el agua.

En segundo lugar, se intenta buscar una explicación al fenómeno. Normalmente, los propios alumnos son capaces con un poco de tiempo de encontrar una explicación adecuada. El profesor debe tratar de orientar el análisis hacia la contrastación y diferenciación de los modelos propuestos.

Las ideas principales que se trabajan son: movimiento de las partículas y necesidad de un espacio vacío. En este caso, es más difícil que con los gases aceptar el modelo microscópico por parte de algunos alumnos y surgen ideas alternativas (por ejemplo, las partículas de agua se tiñen con la tinta) que enriquecen la discusión entre los alumnos y que el profesor debe tener en cuenta.

4. Introducción del efecto de la temperatura en el movimiento de las partículas

En esta fase se introduce el efecto que el cambio de temperatura tiene sobre el movimiento de las partículas. Las actividades se trabajan en las mismas condiciones que en los casos anteriores.

Actividad 5. Dilatación del aire por acción del calor (experiencia de aula)

El objetivo de esta actividad es hacer que el alumno se dé cuenta de que debe existir una relación entre la temperatura de un sistema y el comportamiento de las partículas que lo componen.

Para comenzar, el profesor muestra un matraz con un globo sujeto en su boca. Calienta el recipiente y se observa cómo se va hinchando el globo.

El fenómeno resulta bastante sorprendente para los alumnos. El profesor plantea la búsqueda de una explicación y propone a los alumnos que traten de hacer un dibujo en el que representen lo que ocurre.

Posteriormente se plantea el debate sobre las explicaciones propuestas, al igual que en los casos anteriores, dirigiéndolo hacia la necesidad buscar una relación entre el efecto observado y el cambio de temperatura.

Puede también aprovecharse el hecho, de que mientras los alumnos trabajan el globo vuelve a deshincharse y plantear la necesidad de que la explicación propuesta sea coherente para los dos fenómenos.

Se trata de una actividad muy rica en la que suelen sacarse a la luz ideas alternativas muy resistentes al cambio: la dilatación de las partículas de aire y la acumulación de partículas de aire en la parte superior del recipiente al aumentar la temperatura. Permite trabajar muy bien sobre las consecuencias que tendrían los modelos propuestos por los alumnos y que comprendan fácilmente sus limitaciones, incluso buscando experimentos alternativos (por ejemplo, calentando boca abajo el matraz con el globo). Generalmente, al igual que en las actividades anteriores, los alumnos son capaces a través del debate de ir delimitando poco a poco los modelos y de llegar a explicaciones correctas, aunque posteriormente el profesor deba resumir y resaltar los aspectos más importantes.

5. Cambios de estado

Se trata de introducir los cambios de estado y los mecanismos implicados en el cambio, de forma que

se vaya generalizando el modelo a casos cada vez más complejos. Se analizan los cambios desde los dos puntos de vista, macroscópico y microscópico, centrándonos en cómo la teoría cinética nos proporciona una vía para proponer un mecanismo para el cambio.

Se plantea de forma teórica el ejemplo de un cubito de hielo que se deja encima de un plato y su evolución desde el estado sólido al estado vapor, pasando por el estado líquido. La actividad se plantea siguiendo la misma metodología descrita en los casos anteriores.

6. Generalización a otros casos

La instrucción se completa analizando otros ejemplos teóricos en los que entren en juego los distintos aspectos trabajados: Efecto del sol sobre un balón de fútbol, funcionamiento de un termómetro, evaporación del agua, condensación del agua en una ventana, sublimación de un ambientador casero, etcétera.

¿Qué aprenden los alumnos con esta enseñanza?

En una investigación que estamos realizando (Gómez Crespo, 2003), hemos comparado los resultados obtenidos a partir de este tipo de instrucción, basada en la contrastación y diferenciación entre los modelos macroscópico y microscópico, con los obtenidos a partir de una instrucción más clásica orientada a la exposición del modelo microscópico y la realización de ejercicios de aplicación. Para ello, otro grupo de alumnos del mismo centro educativo ha seguido un proceso simultáneo, en el que se ha empleado aproximadamente el mismo tiempo de instrucción (con las únicas diferencias debidas a las incidencias propias del trabajo en el aula), con un mismo libro de texto. En este segundo grupo se expone la teoría corpuscular de la misma manera que en el grupo experimental, pero no se hace referencia a la diferencia con la descripción macroscópica del problema. Se realizan las mismas actividades, pero sólo a partir de la explicación microscópica, sin establecer diferencias con la macroscópica. Lógicamente, el fenómeno macroscópico está presente de forma implícita en todas las tareas, puesto que se trata de explicar transformaciones observables de la materia, pero se explican sólo desde el punto de vista microscópico sin incidir en las diferencias entre las dos aproximaciones.

El estudio se ha llevado a cabo en tres fases (Gómez Crespo, 2003). En una *primera fase* se aplicó

a ambos grupos un cuestionario de evaluación (pretest), dirigido a analizar cómo utilizan los estudiantes la teoría cinética. En la *segunda fase* se procedió al periodo de instrucción, de la misma duración aproximadamente para los dos grupos, como ya se ha indicado. En la *tercera fase*, se volvió a aplicar el mismo cuestionario (postest) a los dos grupos, una vez transcurridos aproximadamente tres meses desde la primera aplicación y dos meses desde el final de la instrucción. El cuestionario utilizado va dirigido a analizar cómo utilizan los estudiantes la teoría cinética en tres aspectos importantes: noción de discontinuidad y vacío, movimiento intrínseco de las partículas y mecanismo implicado en los cambios. Las respuestas se analizaron comparando los resultados de ambos grupos (experimental y de control) en el postest, descontando el efecto del nivel inicial de los alumnos (pretest), mediante un análisis de covarianza que nos ayudara a fijar las diferencias debidas al tipo de instrucción recibida.

Los resultados muestran que ambos tipos de instrucción producen progreso y aprendizaje de los alumnos. En los dos casos aumenta significativamente el número de respuestas correctas después de la instrucción. Sin embargo, hemos encontrado que el método de enseñanza que se está investigando, basado en la diferenciación y contrastación de modelos, produce resultados significativamente mejores en dos de los problemas estudiados: la noción de discontinuidad de la materia y los mecanismos implicados en los cambios. Asimismo, en el tercer aspecto estudiado, el movimiento intrínseco, parece observarse la misma tendencia aunque las diferencias que aparecen no llegan a ser estadísticamente significativas. En la figura 3 se muestran los resultados obtenidos cuando se analiza la comprensión de la discontinuidad de la materia.

En relación con el aspecto con que se nos presenta la materia, los tres estados de agregación, también se observa un efecto significativo de la influencia del tipo de instrucción. Así, los alumnos que reciben la instrucción experimental aceptan más fácilmente la existencia de espacios vacíos entre las partículas en los sólidos y en los líquidos, los contenidos en los que las investigaciones previas mostraban que era más difícil de aceptar. En el cuestionario sobre el mecanismo implicado en los cambios de la materia también se observa un efecto significativo de la superioridad del tipo de instrucción aplicado al grupo experimental para los contenidos cambio de estado y dilatación, los contenidos en los que se

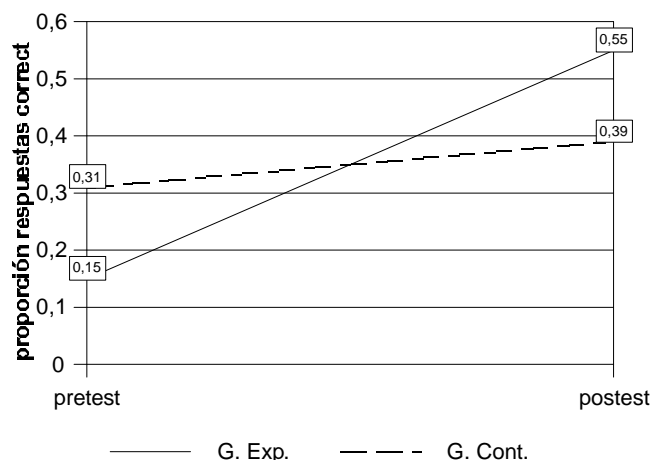


Figura 3. Comparación entre los dos métodos de enseñanza con respecto a la comprensión de la discontinuidad de la materia. Grupo experimental: enseñanza basada en la diferenciación entre los modelos macroscópico y microscópico. Grupo de control: enseñanza basada en la aplicación directa del modelo microscópico.

produce un cambio físico en el que se mantiene la naturaleza de la sustancia y en los que interviene una sola sustancia en el proceso. No hay diferencias significativas entre los dos grupos en el caso de las disoluciones ni las reacciones, contenidos en los que investigaciones anteriores habían mostrado que para los alumnos resultaba más fácil aceptar la interacción entre partículas, debido a la presencia de dos sustancias diferentes. El análisis cualitativo de las representaciones utilizadas por los estudiantes y su progresión con el aprendizaje nos muestra cómo, en general, en el grupo que recibe una enseñanza basada en la diferenciación entre modelos explicativos hay un mayor porcentaje de sujetos, que en el grupo de control, que evoluciona hacia la utilización de la teoría científica de una forma consistente.

Resumiendo, puede afirmarse, al menos a la luz de este estudio cuyos resultados estamos intentando replicar en el marco de un trabajo más amplio, que la instrucción experimental, dirigida a promover una diferenciación e integración jerárquica de los modelos macroscópico y microscópico de interpretación de las propiedades y cambios de la materia, produce una mejora en el aprendizaje de los alumnos y conduce a una utilización más consistente de la teoría científica cuando se la compara con una instrucción más tradicional en la que se expone y se trabaja sólo con el modelo microscópico sin inducir un diálogo continuo, pero jerarquizado, entre esos diferentes niveles de análisis de la materia.

Los resultados que hemos avanzado en este

trabajo son para nosotros muy esperanzadores, aunque dejen algunas preguntas importantes en el aire a los que estamos dirigiendo nuestras nuevas investigaciones: ¿esta mejora será más duradera con el tiempo?, ¿se transferirá a otros contenidos diferentes en los que la comprensión de la teoría cinético corpuscular sea relevante en el aprendizaje?, ¿por qué en algunos contenidos parece que la instrucción específica no tiene efecto? Pero en todo caso, este estudio, aunque deba ser tomado con cautela, abre nuevas posibilidades de investigación no sólo en relación con el cambio conceptual o representacional sobre la naturaleza de la materia, sino en general para la comprensión de la química y para la educación científica, cada vez más necesaria socialmente, ya que la alfabetización científica debe ser una exigencia básica si queremos convertir verdaderamente la sociedad de la información en sociedad del conocimiento (Pozo, 1996, 2003).

Como hemos intentado argumentar en otras ocasiones, la comprensión de los procesos de aprendizaje y la mejora de las estrategias didácticas son dos aspectos indisolubles que se alimentan mutuamente (Pozo y Gómez Crespo, 1998). Este diálogo continuo —¿esta mutua redesccripción representacional?— entre la psicología del aprendizaje y la enseñanza de la ciencia es no sólo una señal de identidad de nuestra propia biografía o trayectoria investigadora, sino, creemos, la vía más fértil para avanzar tanto en nuestro conocimiento de los procesos psicológicos que intervienen en el aprendizaje como en el diseño de estrategias instruccionales más eficaces para mejorar la educación científica. Estamos persuadidos de que sólo si comprendemos cómo aprenden los alumnos podemos mejorar la forma en que podemos enseñarles, pero también que sólo si comprendemos la forma en que les enseñamos podemos llegar a entender las dificultades de aprendizaje que viven. Y a juzgar por algunos de los resultados aquí presentados, es mucho aún lo que tenemos que estudiar y que cambiar en nuestras aulas para lograr que la ciencia, y más específicamente la química, formen parte del acervo cultural común en esta nueva sociedad del conocimiento. Muchos son los esfuerzos que debemos hacer para mejorar la educación química no sólo entre los estudiantes de secundaria, sino, por lo que hemos comprobado, también entre los alumnos universitarios, ya que, por si fuera poco, algunos de ellos serán quienes deban ayudar a otros a aprender ciencia o a educarse químicamente en los años venideros. ▀

Bibliografía

- Benlloch, M. (1997) *Desarrollo cognitivo y teorías implícitas en el aprendizaje de las ciencias*. Madrid: Visor.
- Córdova, J.L. (1990) *La química en la cocina*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Driver, R.; Guesne, E. y Tiberghien, A. (eds.) (1985) *Children's ideas in science*. Milton Keynes: Open University Press. Trad. cast. de P. Manzano: *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*. Madrid: Morata, 1990.
- Driver, R.; Squires, A.; Rushworth, P., y Wood-Robinson, V. (1994). *Making sense of secondary school*. Londres: Routledge. Trad. cast. de M.J. Pozo: *Dando sentido a la ciencia en secundaria*. Madrid: Visor, 1999.
- Duit, R. (1999) Conceptual Change. Approaches in science education. En: W. Schnotz; S. Vosniadou y M. Carretero (eds.) *New Perspectives on conceptual change*. Oxford: Elsevier Science.
- Gabel, D. y Bunce, D. (1994) Research on problem solving: Chemistry. En D. Gabel (ed.) *Handbook of research on science teaching and learning*. N. York: Macmillan.
- Garnett, P.J.; Garnett, P.J. y Hackling, M.W. (1995) Students' Alternative Conceptions in Chemistry: A Review of Research and Implications for Teaching and Learning. *Studies in Science Education*, 25, 69-95.
- Glynn, S.M. y Duit, R. (eds.) (1995) *Learning science in schools*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.
- Gómez Crespo, M.A. (1996) Ideas y dificultades en el aprendizaje de la química. *Alambique*, 7, 37-44.
- Gómez Crespo, M.A. (2003) *Aprendizaje e instrucción en Química. El cambio de las representaciones de los estudiantes sobre la materia*. Memoria para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados. Facultad de Psicología, Universidad Autónoma de Madrid.
- Gómez Crespo, M.A. y Pozo, J.I. (2000) Las teorías sobre la estructura de la materia: discontinuidad y vacío. *Tarbiya*, 26, 117-139.
- Gómez Crespo, M.A. y Pozo, J.I. (2001) La consistencia de las teorías sobre la naturaleza de la materia: una comparación entre las teorías científicas y las teorías implícitas. *Infancia y Aprendizaje*, 24(4), 441-459.
- Gómez Crespo, M.A. y Pozo, J.I. (2003) Discontinuidad de la materia: más allá de nuestros sentidos. En: *Aspectos didácticos de Física y Química (Química)*. 11. I.C.E. de la Universidad de Zaragoza.
- Gómez Crespo, M.A. y Pozo, J.I. (en prensa) Relationships between everyday knowledge and scientific knowledge: understanding how matter changes. *International Journal of Science Education*.
- Gómez Crespo, M.A.; Pozo, J.I. y Sanz, A. (1995) Students' ideas on conservation of matter: effects of expertise and context variables. *Science Education*, 79 (1): 77-93.
- Gutiérrez Julián, M.S.; Gómez Crespo, M.A. y Pozo, J.I. (2002) Conocimiento cotidiano frente a conocimiento científico en la interpretación de las propiedades de la materia. *Investigações em Ensino De Ciências*, 7 (3). [http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol7/n3/v7_n3_a1.htm]
- Huann, L.; Hsiu, Ch. y Lawrenz, F. (2000) The Assessment of Students and Teachers' Understanding of Gas Laws. *Journal of Chemical Education*, 77(2), 235-238.
- Karmiloff-Smith, A. (1992) *Beyond modularity*. Cambridge, Mass.: Cambridge University Press. Trad. cast. de J.C. Gómez y María Nuñez: *Más allá de la modularidad*. Madrid: Alianza, 1994.
- Limón, M. y Mason, L. (eds.) (2002) *Reconsidering conceptual change*. Dordrecht, Holanda: Kluwer.
- Llorens, J.A. (1991) *Comenzando a aprender química. De las ideas alternativas a las actividades de aprendizaje*. Madrid: Visor.
- Mortimer, E. (2001) Perfiles conceptuales: modos de pensar y modos de hablar en las clases de ciencias. *Infancia y Aprendizaje*, 24 (4).
- Niaz, M. (2000) A rational reconstruction of the kinetic molecular theory of gases based on history and philosophy of science and its implications for chemistry textbooks. *Instructional Science* n° 28, 23-50.
- Osborne, R.J. y Freyberg, P. (eds.) (1985) *Learning in science: the implications of "children's science"*. N. Zelanda: Heinemann Educational. (Trad. Cast. de T. Serrano: El aprendizaje de las Ciencias: implicaciones de la ciencia de los alumnos. Madrid: Narcea, 1991).
- Pozo, J.I. (1996) *Aprendices y maestros: la nueva cultura del aprendizaje*. Madrid: Alianza.
- Pozo, J.I. (2002) La adquisición del conocimiento científico como un proceso de cambio representacional. *Investigações em Ensino De Ciências*, 7 (3). [http://www.if.ufrgs.br/public/ensino/vol7/n3/v7_n3_a1.htm]
- Pozo, J.I. (2003) *Adquisición del conocimiento: cuando la carne se hace verbo*. Madrid: Morata.
- Pozo, J.I. y Gómez Crespo, M.A. (1998) *Aprender y enseñar ciencia*. Madrid: Morata.
- Pozo, J.I. y Gómez Crespo, M.A. (2002a) Más allá del "equipoamiento cognitivo de serie": la comprensión de la naturaleza de la materia. En: Benlloch, M. (comp.) *La educación en ciencias: ideas para mejorar su práctica*. Paidós.
- Pozo, J.I. y Gómez Crespo, M.A. (2002b) La adquisición del conocimiento científico ¿una prótesis cognitiva? *Innovación y Ciencia*, X (3 y 4) p. 34-43.
- Pozo, J.I. y Gómez Crespo, M.A. (en prensa) The embodied nature of implicit theories: the consistency of ideas about the nature of matter. *Cognition and Instruction*.
- Pozo, J.I.; Gómez Crespo, M.A.; Limón, M. y Sanz, A. (1991) *Procesos cognitivos en la comprensión de la Ciencia: Las ideas de los adolescentes sobre la Química*. Madrid. Centro de Publicaciones del M.E.C.: CIDE.
- Pozo, J.I.; Gómez Crespo, M.A. y Sanz, A. (1999) When Change Does Not Mean Replacement: Different Representations for Different Contexts. En: W. Schnotz; S. Vosniadou y M. Carretero (Eds) *New Perspectives on conceptual change*. Pergamon. Elsevier Science.
- Pozo, J.I.; Gutiérrez Julián, M.S. y Gómez Crespo, M.A. (2004) El cambio conceptual como un proceso de reestructuración: la representación de la naturaleza de la materia. Comunicación presentada en el V Congreso de la Sociedad Española de Psicología Experimental (SEPEX), Madrid, marzo de 2004.
- Pozo, J. I. y Rodrigo, M.J. (2001) Del cambio de contenido al cambio representacional en el conocimiento conceptual. *Infancia y Aprendizaje*, 24 (4), 407-423.
- Rodríguez Moneo, M. (1999) *Conocimiento previo y cambio conceptual*. Buenos Aires: Aique.
- Schnotz, W.; Vosniadou, S. y Carretero, M. (eds.) (1999) *New Perspectives on conceptual change*. Oxford: Elsevier Science.
- Stavy, R. (1995) Conceptual development of basic ideas in Chemistry. En: S. M. Glynn y R. Duit (eds.) *Learning science in schools*. Hillsdale, N.J.: Erlbaum.